

## ПРО ВИКОРИСТАННЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО СУПЕРКОНТИНУУМУ ЯК ДЖЕРЕЛА ДЛЯ ОПТИЧНОЇ КОГЕРЕНТНОЇ ТОМОГРАФІЇ

*Розглянуто можливості практичного застосування фемтосекундного суперконтинууму. Виявлено оптимальні характеристики фемтосекундного суперконтинууму для подальшого використання як джерела для оптичної когерентної томографії.*

**Ключові слова:** оптична когерентна томографія, фемтосекундний суперконтинуум, мікроструктуровані волокна.

### 1. Вступ

Дослідження внутрішньої структури об'єктів має суттєве значення для біології, медицини та онкології. Сьогодні існує кілька методів тривимірної реконструкції структури об'єктів, як-от: магнітно-резонансна, комп'ютерна та ультразвукова томографії, кожен з яких, вочевидь, має свої невід'ємні переваги. Водночас біомедицина перебуває у постійному пошуку швидких, портативних, неінвазивних методик, які не потребують іонізаційної радіації, радіоактивних ізотопів або видалення тканин для ранньої діагностики захворювань.

Одним із таких методів досліджень є оптична когерентна томографія (ОКТ) [1]. ОКТ — це провідний метод дослідження структури біологічних тканин, який полягає в опроміненні зразків ширококутовим світлом і вимірюванні часової затримки світлового променя, відбитого від досліджуваної тканини. ОК-томографи конструюються на базі двопроменевих інтерферометрів. Переважно більшість томографів сконструйовано на базі інтерферометра Майкельсона.

Як джерело світла в ОКТ сьогодні використовують суперлюмінесцентні діоди [2], але існує низка факторів таких, як низька інтенсивність випромінювання та обмежена ширина спектра, які суттєвим чином обмежують можливості їх застосування.

Використання ширококутового просторово когерентного «білого» світла — суперконтинууму для ОКТ, згенерованого в одномодовому мікроструктурованому (МС) волокні при збудженні надкороткими лазерними імпульсами для ОКТ, дає змогу значно збільшити роздільну здатність і контрастність реконструйованих зображень. Основними нелінійно-оптичними явищами, що призводять до наддушення вхідного імпульсу в МС волокнах є фазова самомодуляція, чотирихвильове змішування, вимушене комбінаційне розсіювання, солітонні ефекти та ін. [3, 4]

Останнім часом активні дослідження з використанням можливостей суперконтинууму як джерела для ОКТ здійснюються у провідних лабораторіях світу: Массачусетському технологічному інституті (США) [5, 6], університеті Базу, (Велика Британія) [7], університеті Відня (Австрія) [8]. Зокрема, в Росії лідерами досліджень у цьому напрямі є група вчених Нижньгородського Інституту прикладної оптики РАН [9].

Мета цієї роботи — дослідити можливості використання фемтосекундного суперконтинууму як ефективного джерела для ОКТ.

### 2. Основні фізичні принципи спектральної оптичної томографії

ОКТ дає можливість формувати мікроскопічне зображення внутрішньої оптичної структури досліджуваних об'єктів у трьох вимірах. При цьому роздільна здатність ОКТ-систем суттєво різниться. Виокремлюють два основних напрямки: позовдовжний та поперечний. У поперечному напрямку роздільна здатність визначена діаметром перетяжки сфокусованого зондуєного пучка. У позовдовжному напрямку роздільна здатність зумовлена довжиною часової когерентності (1). Це означає, що єдиний спосіб поліпшення роздільної здатності ОК-томографів — розширення спектрів вхідного випромінювання

$$l_c = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi} \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

де  $l_c$  — довжина когерентності,  $\bar{\lambda}$  — центральна довжина хвилі,  $\Delta\lambda$  — ширина спектру.

Використання ширококутового «білого» світла, згенерованого в одномодовому мікроструктурованому волокні при збудженні фемтосекундними лазерними імпульсами для ОКТ, дає змогу значно збільшити роздільну здатність і контрастність реконструйованих зображень. Оптичні неоднорідності, менші за розміром довжини часової коге-

рентності не розрізняються в ОКТ. Також, якщо відстань між сусідніми імпульсами менше довжини когерентності, імпульси накладаються і сприймаються як один.

### 3. Експериментальна частина

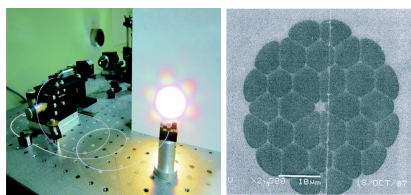
Експериментальні дослідження проводилися на базі Інституту фізики НАНУ. У відділі квантової і когерентної оптики розроблено універсальне джерело суперконтинууму на базі мікструктурованого фотонно-кристалічного волокна, яке накачувалося випромінюванням фемтосекундного Ti:Sapphire лазера Mira Optima 900-F. Базові функціональні параметри «Лазерного фемтосекундного комплексу» Центру колективного користування при Інституті фізики НАНУ:

- мінімальна тривалість імпульсу  $\tau = 100$  фс;
- максимальне значення енергії імпульсу  $W = 6,5$  нДж;
- максимальна пікова потужність  $P_{\max} = 65$  кВт;
- частота повторення імпульсу 76 МГц.

Характеристики МС-волокна Н 071015:

- довжина хвилі нульової дисперсії  $800 \pm 5$  нм;
- діаметр серцевини волокна 2,5 мкм;
- діаметр повітряних отворів 7,5 мкм.

Визначальними обставинами для генерації просторо-когерентного «білого» світла є дисперсія волокна стосовно довжини хвилі накачки, тривалості імпульсу та пікової потужності. Дисперсія, та особливо її знак, визначає тип нелінійних ефектів, що формують СК [10], і, загалом, впливає на вигляд спектра – спектральну форму і стабільність. В області аномальної дисперсії уширення спектра відбувається завдяки ФСМ і чотирихвильовому змішуванню. Згенерований спектр достатньо широкий і може бути використаний для різних

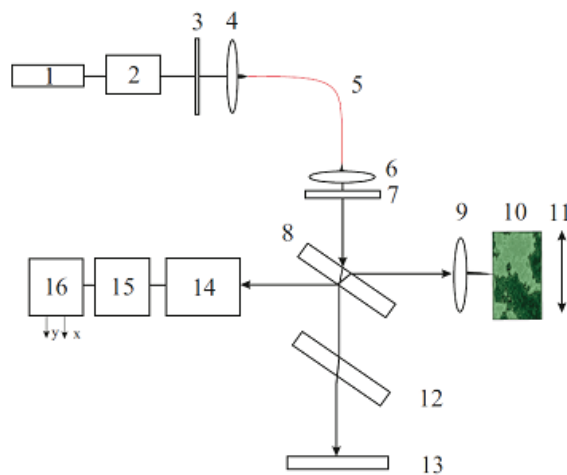


**Рис. 1.** Просторовий розподіл інтенсивності СК на виході МС волокна та поперечний переріз волокна

задач. Як наслідок, на виході волокна отримували просторово-когерентне випромінювання в спектральному діапазоні від 530 нм до 1100 нм з піковим значенням потужності 40 кВт, максимальна густина спектральної потужності близь-

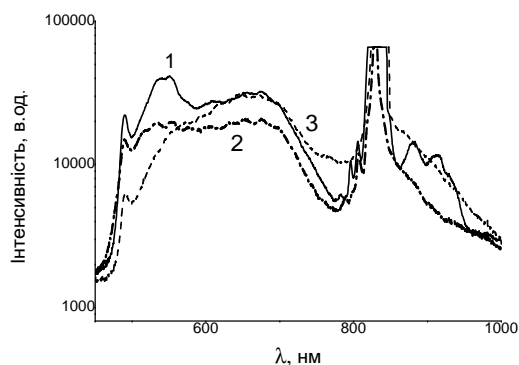
ко 300 мВт/нм і середня густина потужності 0,3 мВт/нм при рівні сигналу не менше 5 дБ. На рис. 1 представлено просторовий розподіл інтенсивності СК на виході МС волокна та поперечний переріз волокна марки Н 071015.

За таких характеристик джерела суперконтинууму роздільна здатність сконструйованої на основі інтерферометра Майкельсона ОКТ-системи може сягати 1 мкм, цього достатньо для дослідження клітинних структур, розміри яких варіюються від 10–50 мкм. Досягнення високої контрастності реконструйованих зображень можливе завдяки великому піковому значенню потужності джерела фемтосекундного випромінювання. Блок-схему установки ОКТ із використанням фемтосекундного суперконтинуума як джерела зображено на рис. 2.

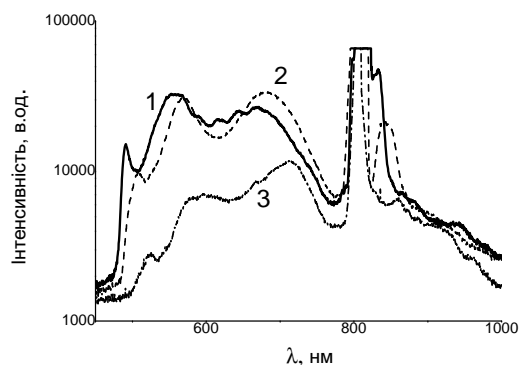


**Рис. 2.** Блок-схема експериментальної установки ОКТ. 1) Ti:Sapphire лазер Mira Optima 900-F; 2) ізолятор Фарадея; 3) напівхвильова пластинка; 4) ввідна лінза; 5) мікструктуроване оптичне волокно; 6) лінза колімаційна; 7) широкопasmовий фільтр; 8) світлоподільна пластинка; 9) лінза – об’єктив; 10) зразок; 11) системи сканування в площині  $xy$ ; 12) компенсатор; 13) дзеркало; 14) спектрометр Ocean Optics USB 400; 15) персональний комп’ютер; 16) контролери гальванічних елементів

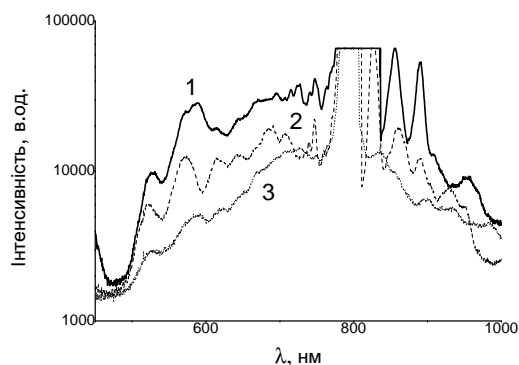
Суттєве значення для розширення спектра має величина вхідної потужності лазерного випромінювання, центральна довжина хвилі накачки, і довжина МС волокна. Важливо зазначити, що застосування оптичних волокон із довжиною 50 см дає змогу отримувати більш гладкі спектри. Залежність розширення спектра від основних параметрів зображено на рис. 3–6.



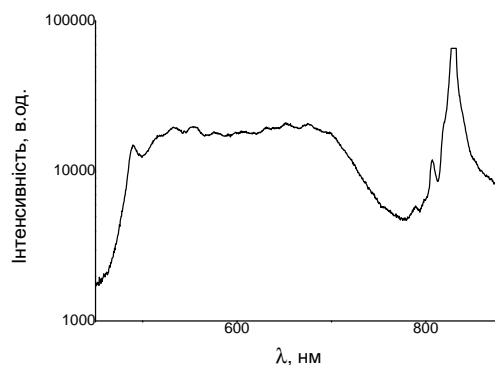
**Рис. 3.** Спектр фемтосекундного суперконтинууму, отриманий у МС волокні марки Н 071015: довжина волокна 50 см, довжина хвилі імпульсу накачки 830 нм, потужність імпульсу накачки: 1)  $P = 870$  мВт, 2)  $P = 630$  мВт, 3)  $P = 420$  мВт



**Рис. 4.** Волокно марки Н 071015, довжина волокна 50 см, довжина хвилі імпульсу накачки 810 нм, потужність імпульсу накачки: 1)  $P = 830$  мВт 2)  $P = 570$  Вт, 3)  $P = 320$  мВт



**Рис. 5.** Волокно марки Н 071015, довжина волокна 50 см, довжина хвилі імпульсу накачки 790 нм, потужність імпульсу накачки: 1)  $P = 880$  мВт, 2)  $P = 650$  мВт, 3)  $P = 380$  мВт



**Рис. 6.** Спектр фемтосекундного суперконтинууму, отриманий у МС волокні марки Н 071015: довжина волокна 50 см, довжина хвилі імпульсу накачки 830 нм, потужність імпульсу накачки  $P = 630$  мВт

На рис.6 наведено спектр суперконтинууму, згенерованого в МС волокнах, який завдяки своїм характеристикам є зручним для використання як джерело випромінювання в ОКТ-системах.

#### 4. Висновки

Подальший прогрес у галузі оптичної когерентної томографії може бути пов'язаний із розробкою нових методів аналізу та обробки поляризаційно-неоднорідних зображень біологічних тканин і пошуком та дослідженням нових джерел для ОКТ.

Тут проаналізовано основні фізичні принципи спектральної оптичної томографії, розроблено блок-схему експериментальної установки ОКТ на базі інтерферометра Майкельсона та використано серію експериментальних досліджень з пошуку оптимальних характеристик фемтосекундно-

го суперконтинууму для подальшого використання як джерела для ОКТ. Значення оптимальних характеристик для Ti Sapphire Mira Optima F і нелінійно-оптичного мікроструктурованого волокна Н 071015 становлять: довжина хвилі накачки 830 нм, потужність накачки 630 мВт, довжина волокна не менше 50 см.

Автори висловлюють подяку співробітнику Інституту фізики НАНУ старшому науковому співробітнику відділу квантової і когерентної оптики, кандидату фіз.-мат. наук Качаловій Н. М. за постановку задачі та допомогу у виконанні серії експериментів, а також за корисні дискусії.

Роботу здійснено за підтримки спільного гранту НАНУ і РФФД № 42-02-12 та цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАНУ «Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій» на 2010–2014 рр.

## Список літератури

1. Гуров И. П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы / И. П. Гуров // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. Под ред. Гурова И. П. и Козлова С. А. — СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2004. — С. 6–30.
2. Kowalewicz A. Ultrahigh resolution optical coherence tomography using a superluminescent light source / A. Kowalewicz, T. Ko, I. Hartl, J. Fujimoto, M. Pollnau, R. Salath // Opt. Express. — 2002. — № 7. — P. 349–353.
3. Dudley J. M. Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber / J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen // Reviews of Modern Physics. — 2006. — Vol. 78. — № 4. — P. 1135–1184.
4. Желтиков А. М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами / А. М. Желтиков // УФН. — 2006. — Т. 176. — № 6. — С. 623–649.
5. Wojtkowski M. Ultrahigh-resolution, high-speed, Fourier domain optical coherence tomography and methods for dispersion compensation / M. Wojtkowski, V. Srinivasan, T. Ko, J. Fujimoto, A. Kowalczyk, J. Duker // Opt. Exp. — 2004. — Vol. 12. — P. 2404–2422.
6. Hsiung P. Optical coherence tomography using a continuous-wave, high-power, Raman continuum light source / P. Hsiung, Y. Chen, T. Ko, J. Fujimoto, C. Matos, S. Popov, J. Taylor, V. Gapontsev // Opt. Express. — 2004. — Vol. 22. — P. 5287–5295.
7. Humbert G. Supercontinuum generation system for optical coherence tomography based on tapered photonic crystal fiber / G. Humbert, W. J. Wadsworth, S. G. Leon-Saval, J. C. Knight, J. Russell // Opt. Express. — 2006. — Vol. 14. — P. 1596–1603.
8. Fercher A. F. Optical coherence tomography / A. F. Fercher // Biomed. Opt. — 1996. — Vol. 1. — P. 157–173.
9. Gladkova N. D. Cross polarization optical coherence tomography for early bladder cancer detection: statistical study / N. D. Gladkova, O. S. Streltsova, E. V. Zagaynova, E. B. Kiseleva, V. Gelikonov, K. Yunusova // J. Biophotonics. — 2011. — Vol. 4. — Is. 7–8. — P. 519–532.
10. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. — М.: Мир, 1996. — 324 с.

*A. Hodko, V. Khomenko, V. Voitsekhovich, O. Kachalova*

## ON IMPLEMENTATION OF A FEMTOSECOND SUPERCONTINUUM AS A PUMP SOURCE IN OPTICAL COHERENT TOMOGRAPHY

*Implementation capability of a femtosecond supercontinuum is considered. Optimal characteristics of the supercontinuum are detected for its application as an optical coherent tomography pump source.*

**Keywords:** optical coherent tomography, femtosecond supercontinuum, photonic crystal fiber.

Матеріал надійшов 28.03.2012